

3D-Multimaterialdruck für die Fertigung von Komponenten elektromagnetischer Energiewandler

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Rudolph, Dipl.-Ing. Fabian Lorenz, Univ. Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, Technische Universität Chemnitz

1 Einleitung

1.1 Kunststoffbasierte 3D-Druckverfahren

Im Bereich der additiven Fertigungsverfahren stellt der 3D-Druck eine interessante Möglichkeit dar, mit dessen Hilfe sich Werkstücke herstellen lassen, deren Fertigung mit konventionellen Technologien zu aufwändig bzw. nicht realisierbar ist. Der auf 3D-Druck basierende Umsatz betrug im Jahr 2016 allein in Deutschland ca. eine Milliarde Euro. Das entspricht einen Anteil von zehn Prozent am weltweiten Umsatz, der auf zehn Milliarden Euro beziffert wird [1]. Besonders kunststoffbasierte Verfahren wie FFF (Fused Filament Fabrication), FDM (Fused Deposition Modeling), STL (Stereolithografie), DLP (Digital Light Processing), MJM (Multi Jet Modeling) und FTI (Film Transfer Imaging) sind mittlerweile weit verbreitet. Ursprünglich wurden mit Hilfe dieser Verfahren hauptsächlich Prototypen und Konzeptmodelle für industrielle Anwendungen gefertigt. Aufgrund eines großen Interesses aus dem Bastler- und Hobbybereich und einer umfangreichen und gut vernetzten Open-Source-Community sind die Preise für 3D-Drucker, die weitestgehend nach dem FDM-Verfahren arbeiten, in den letzten Jahren deutlich gesunken. Mittlerweile ist davon auszugehen, dass ein Großteil der 3D-Drucker in privaten Haushalten zum Einsatz kommt. Grundlegend können mit Hilfe der genannten Verfahren geometrisch äußerst komplexe Bauteile hergestellt werden, deren technische Eigenschaften jedoch durch die Tatsache, dass ausschließlich Kunststoffe zum Einsatz

kommen, stark begrenzt sind. Strukturen mit nennenswerten elektrischen, magnetischen oder mechanischen Eigenschaften lassen sich mit kunststoffbasierten Verfahren nicht herstellen.

1.2 3D-Druckverfahren mit metallischen oder keramischen Materialien

Parallel zu den 3D-Kunststoffdruckern haben sich in den letzten Jahren additive Verfahren entwickelt, bei denen Metalle oder Keramiken für den Aufbau von dreidimensionalen Strukturen eingesetzt werden. Diese als SLS (Selective Laser Sintering) bzw. SLM (Selective Laser Melting) bezeichneten Fertigungstechnologien basieren auf feinen metallischen und keramischen Pulvern, die mittels fokussierter Energie, die in den meisten Fällen durch einen Laser eingebracht wird, lokal aufgeschmolzen oder gesintert werden. Der Aufbau erfolgt analog zu den bereits erwähnten Verfahren schichtweise. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, werden bei derartigen Anlagen oft Schutzgase im Bereich des Bauraums eingesetzt. Dies führt neben den erforderlichen Lasern und den dazugehörigen Optiken zu erheblich höheren Anschaffungskosten für solche Anlagen. Gleichzeitig sind qualitativ hochwertige Pulver deutlich teurer als Kunststofffilamente. Aufgrund der deutlich höheren Kosten für pulverbettbasierte Drucker kommen diese derzeit fast ausschließlich im industriellen Umfeld zum Einsatz. Gegenüber kunststoffbasierten Drucktechnologien ermöglichen diese jedoch den Aufbau von komplexen und feinstrukturierten Körpern, die über gute mechanische Eigenschaften verfügen. Besonders interessant ist der Einsatz von Titanpulvern. Dieses Metall verfügt über hervorragende mechanische Eigenschaften, weist aber im Gegensatz zu Stahl eine Dichte auf, die um mehr als den Faktor zwei kleiner ist. Es ist daher besonders für den Einsatz in der Luft und Raumfahrt geeignet. Die Bearbeitung von Titan ist auf Grund seiner hohen Zähigkeitseigenschaften und des geringen Elastizitätsmoduls, sowie der Neigung zur Kaltverfestigung hingegen aufwendiger und damit teurer, als es bei herkömmlichen Stählen der Fall ist. Mit Hilfe des 3D-Drucks von Titanbauteilen gelingt somit erstmals der Schritt weg vom reinen Demonstrationsobjekt hin zu Bauteilen, die eine Funktion übernehmen und in der Praxis zum Einsatz kommen [2].

1.3 Grenzen derzeitiger 3D-Druckverfahren

Für die Fertigung komplexer Komponenten, die mehr als eine hohe Strukturfeinheit oder eine gute mechanische Festigkeit aufweisen, ist die Integration von mehreren Materialien in einem Druckprozess notwendig. Um beispielsweise ganze Funktionsbaugruppen, wie die Wicklung von elektrischen Maschinen herstellen zu können, ist es zwingend erforderlich, neben einem elektrisch leitfähigen Material, ein zweites elektrisch isolierendes Material zu verarbeiten. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist, bis auf den an der Technischen Universität Chemnitz entwickelten 3D-Multimaterialdruck, kein Verfahren in der Lage, mehrere Materialien mit unterschiedlichen elektrischen, mechanischen und magnetischen Eigenschaften in einem Druckprozess zu verarbeiten. Sogenannte Support-Materialien sind in dieser Betrachtung ausgenommen, da diese nur während des Aufbaus aber nicht für die Funktion eines gedruckten Bauteils von Bedeutung sind.

2 3D-Multimaterialdruck

Bei dem 3D-Multimaterialdruck handelt es sich um ein Verfahren, mit dem es erstmals möglich ist, mehrere Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften in einem Arbeitsgang zu drucken. Grundlegend sind die Grenzen bei der Herstellung von elektrischen Maschinen und deren Auslegung in den Möglichkeiten konventioneller Fertigungsverfahren zu suchen. Zum einen lässt sich die Blechung der Magnetkreise nicht in allen Raumdimension realisieren und zum anderen können Wicklungen, auch wenn sie von Hand eingebracht werden, nicht beliebig gestaltet werden. Eine weitere Einschränkung stellen die meist kunststoffbasierten Isolationsmaterialien dar. Diese verfügen über eine geringe thermische Beständigkeit und ein ungünstiges Wärmeleitvermögen, wodurch der Leistungsdichte von elektrischen Maschinen je nach Bauform Grenzen gesetzt sind. Um diese geometrischen und physikalischen Beschränkungen aufzubrechen, wurde an der Professur Elektrischen Energiewandlungssysteme und Antriebe ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich wird, ganze elektromagnetische Energiewandler in einem Arbeitsgang herzustellen. Gleichzeitig lassen sich völlig neue Bauformen von Maschinen realisieren. Durch den Austausch von konventionellen Isolationsmaterialien durch Keramikisolation, werden die thermischen Eigenschaften von Elektromotoren signifikant verbessert.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Druckverfahren, bei denen Pulver, Flüssigkeiten oder Kunststofffilamente zum Einsatz kommen, basiert das neu entwickelte Verfahren auf hochviskosen Pasten, die durch Düsen schichtweise extrudiert werden. Im Anschluss wird eine Wärmebehandlung durchgeführt, bei der der Binder entfernt und das Bauteil gesintert wird (Abbildung 1).

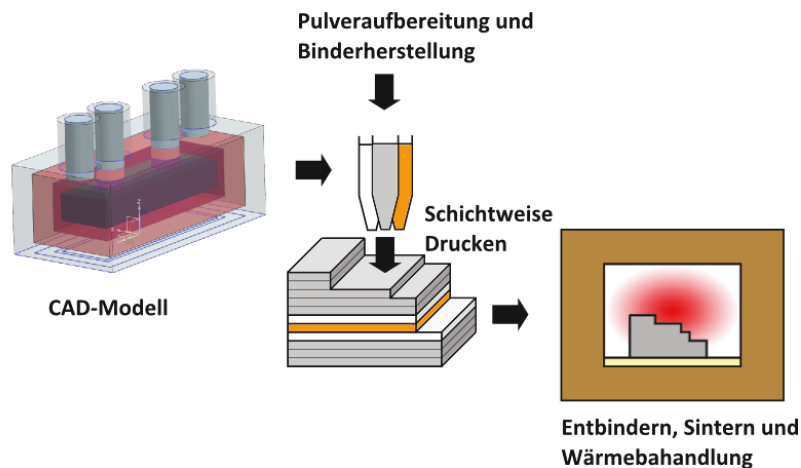


Abb. 1: Arbeitsschritte beim 3D-Multimaterialdruck

Die Pasten bestehen aus speziellen Bindern, in die metallische oder keramische Partikel eingebettet sind. Ausgehend von einem CAD-Modell wird der zu druckende Körper, wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt, in Schichten zerlegt, parametrisiert und die Druckdaten in Form von g-code erstellt.

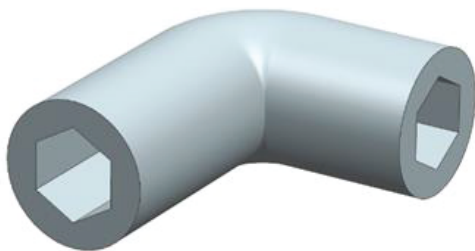


Abb. 2: CAD-Modell eines Druckteils

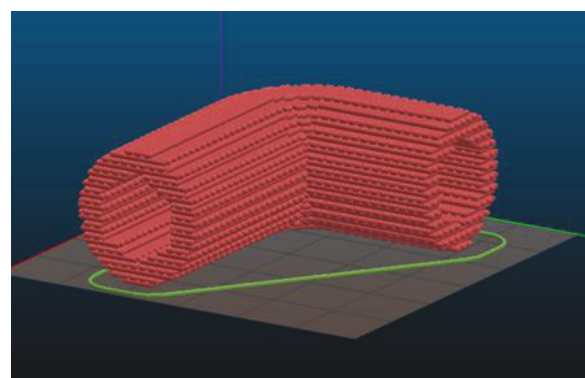


Abb. 3: Extrusionswege eines in Schichten zerlegten Druckteils

3 Mittels 3D-Multimaterialdruck hergestellte keramisch isolierte Spule

Mit Hilfe einer vollständig 3D-gedruckten Spule soll die Leistungsfähigkeit des 3D-Multimaterialdrucks demonstriert werden. Das in Abbildung 4 dargestellte CAD-Modell zeigt den inneren Aufbau der Spule. Die elektrisch aktive Wicklung ist durch bandartige Strukturen realisiert, die in der Ebene verlaufen und nach jeder Windung eine diagonale Verbindung zur nächsten Windung aufweisen.

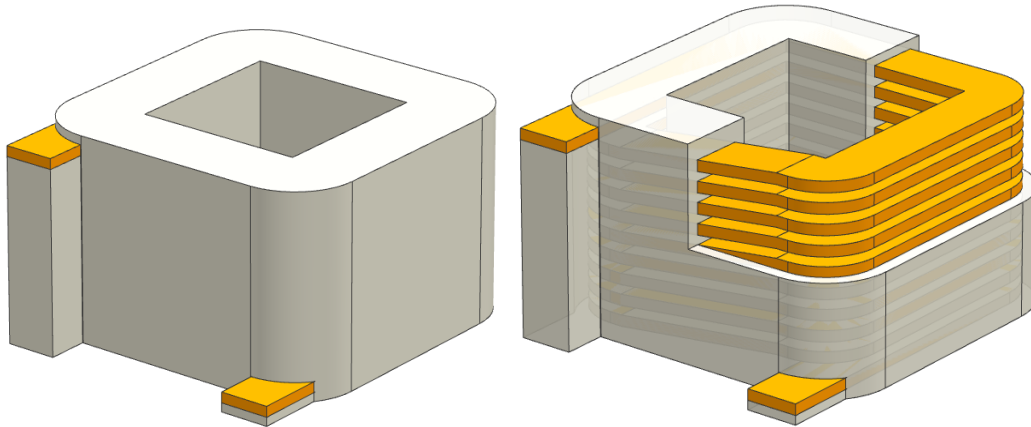


Abb. 4: CAD-Modell der keramisch Isolierten Spule

Die einzelnen Leiterbahnen sind gegeneinander und nach außen durch Keramik, wie in Abbildung 5 dargestellt, isoliert. Die keramische Isolation übernimmt gleichzeitig die Aufgabe einer mechanischen Stabilisierung. Die Kombination von Kupfer in Form von elektrischen leitenden Strukturen und Keramik als Isolationsmaterial auf makroskopischen Skalen, stellt eine besondere Herausforderung dar. Die beiden Materialien weisen grundsätzlich sehr unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Kupfer ist mit $\alpha = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ deutlich höher als der von den meisten keramischen Werkstoffen. Gleichzeitig ist Kupfer relativ weich und gut verformbar, wohingegen Keramiken im Allgemeinen hart und spröde sind. Dies macht eine dauerhafte feste Verbindung beider Materialien, die auch während der Wärmebehandlung und Temperaturwechselspielen im späteren Betrieb bestehen bleibt, aufwendig und ist nur über Umwege zu erreichen. Die wichtigsten Eckdaten der gedruckten Spule sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Abb. 5: Spulen nach der Wärmebehandlung – Schnittbild

Windungszahl	5/10
Leiterquerschnitt	ca. 5 mm ²
Leitfähigkeit Kupfer	ca. 80 % von reinem Kupfer
Spannungsfestigkeit Keramik	min. 2 kV/mm
dauerhaft zulässige Stromdichte	14 A/mm ²
Temperaturfestigkeit	min. 300 °C
Temperatur bei Nennstromdichte	ca. 270 °C

Tab. 1: Wichtige Nenndaten der keramisch isolierten gedruckten Spule

Die wichtigsten Eigenschaften der gedruckten Spulen, die diese von konventionell gefertigten Spulen unterscheidet, ist neben der vollständigen, durch das Druckverfahren bedingten, Gestaltungsfreiheit, die thermische Beständigkeit und das höhere Wärmeleitvermögen der keramischen Isolation. Das mit gedruckten Spulen deutlich höhere Einsatztemperaturen möglich sind, wurde in Versuchen nachgewiesen. Trotz mehrfacher Erwärmung der Spulen auf 300 °C mit anschließenden Abkühlvorgängen auf Raumtemperatur, wurde die mechanische Integrität der keramischen Isolation nicht durch die starke Wärmedehnung der Kupferleiter beschädigt.

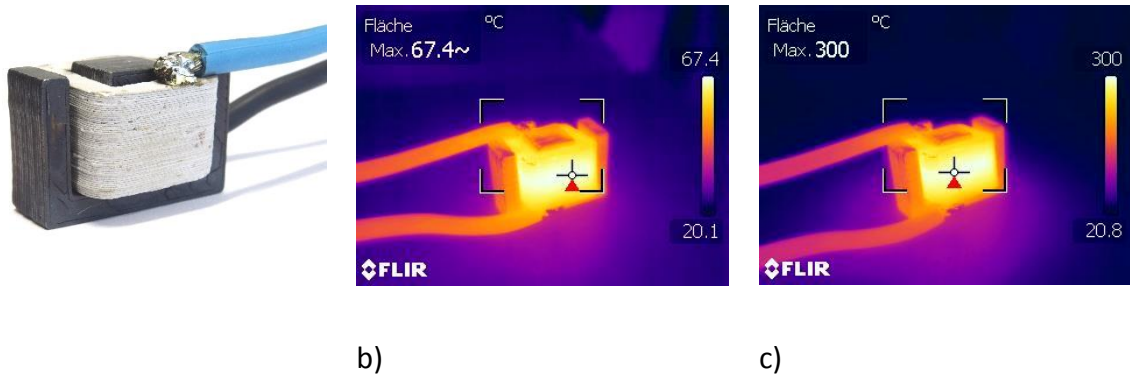


Abb. 6: Spule nach Wärmebeständigkeitstest (a), Wärmebildaufnahme bei ca. 70°C (b) und bei 300 °C (c).

Die in Abbildung 6a dargestellte Spule wurde bereits mehreren Wärmebelastungstests bis 300 °C unterzogen, ohne dass die keramische Isolation erkennbare Risse aufweist. Die Abbildungen 6b und 6c zeigen Wärmebildaufnahmen der Spule bei ca. 70 °C und bei 300 °C.

4 Möglichkeiten und Grenzen des 3D-Multimaterialdrucks

Aus Sicht eines potentiellen Herstellungsverfahrens für elektrische Maschinen weist der 3D-Multimaterialdruck eine ganze Reihe von interessanten Möglichkeiten auf.

4.1 Gestaltungsfreiheit

Der 3D-Multimaterialdruck erlaubt, ähnlich wie andere additive Fertigungstechnologien, eine nahezu vollständige Gestaltungsfreiheit in allen drei Raumdimensionen. Damit lassen sich Magnetkreise realisieren, die den magnetischen Fluss nicht wie üblich nur in radialer Richtung tragen. Mit Hilfe von gedruckten magnetisch aktiven Materialien, die ein ähnliches Verhalten wie SMC (Soft Magnetic Compound) aufweisen, ist es möglich, den Magnetfluss beliebig im Raum zu führen. Dadurch verschiebt sich der Fokus auf alternative Maschinenkonzepte, wie beispielsweise die Transversalflussmaschine, die Prinzip bedingt über eine hohe Leistungsdichte verfügen, deren Herstellung mit konventionellen Fertigungsmethoden aber zu aufwendig ist. So müsste eine Transversalflussmaschine, wie in Abbildung 7 zu sehen, nicht länger aus

einzelnen Segmenten hergestellt werden, deren Zusammenbau und exakte Ausrichtung zueinander aufwendig ist und sich negativ auf die Fertigungskosten einer solchen Maschine auswirkt.

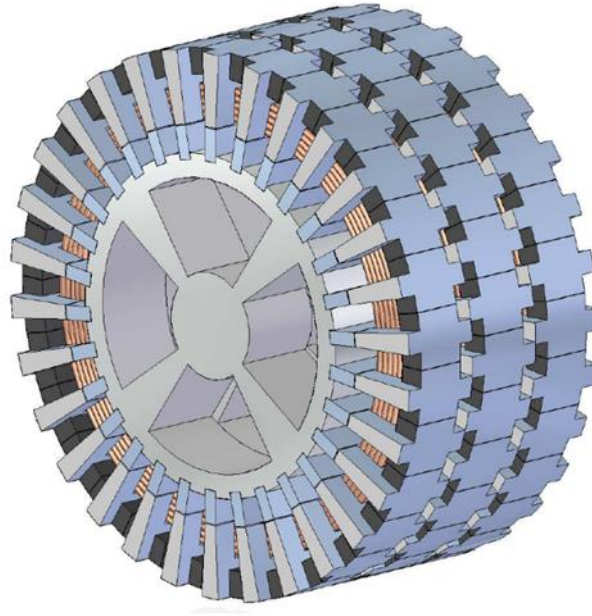


Abb. 7: Vereinfachte Darstellung einer dreiphasigen Transversalflussmaschine [3]

Neben den Möglichkeiten, die der 3D-Multimaterialdruck bei der Gestaltung der magnetisch aktiven Teile bietet, werden gleichsam die Grenzen bei der Auslegung der Wicklungen von elektrischen Maschinen aufgehoben. Mit dem Verfahren wird es möglich, elektrisch leitende Strukturen in Bereiche zu integrieren, die mit derzeitigen Herstellungsverfahren nicht bewickelbar sind.

4.2 Kühlstrukturen

Ein weiterer bedeutender Vorteil des hier vorgestellten neuartigen Verfahrens ist die Möglichkeit, Kühlstrukturen auch auf relativ kleinen Größenskalen in die elektrische Maschine einzubringen, um für einen effizienteren Abtransport der entstehenden Verlustwärme zu sorgen. Eine besonders leistungsfähige Variante stellen elektrische Hohlleiter dar, die von einem Kühlfluid durchströmt werden. Zum einen ließe sich so die Oberfläche erhöhen, über die Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann und zum anderen würde die Verlustenergie direkt

dort abtransportiert wo sie entsteht, in den elektrischen Leitern eines Elektromotors [4]. Zudem besteht nicht länger die Notwendigkeit, Leiterquerschnitte rund auszuführen. Diese können so gewählt werden, dass ein optimaler Nutzfüllfaktor erreicht wird oder eine günstige Integration in die Maschine gewährleistet werden kann.

4.3 Wärmeleitung

Bei der konventionellen Fertigung von elektrischen Maschinen werden die Leiter der Wicklung untereinander durch sehr dünne Lackschichten und gegen das Blechpaket durch Kunststoffeinlagen isoliert. Dazwischen befindet sich auch bei sehr hohen Nutzfüllfaktoren immer Luft, die als schlechter thermischer Leiter den Abtransport von Verlustwärme behindert. Um dem entgegen zu wirken, besteht die Möglichkeit, die Wicklung zusammen mit dem Blechpaket mit Kunstharz zu infiltrieren, so dass die Wärmeleitung durch den Querschnitt der Maschine hin zur Oberfläche des Elektromotors verbessert werden kann. Diese Maßnahme ist allerdings mit zusätzlichen Kosten verbunden. Grundsätzlich sind, aus thermischer Sicht in einer elektrischen Maschine eine Vielzahl von Grenzschichten vorhanden, die einem optimalen Wärmefluss in der Maschine entgegenstehen. Durch den 3D-Multimaterialdruck können diese Einschränkungen weitestgehend aufgehoben werden. Durch den Druckprozess und die anschließende Wärmebehandlung sind die unterschiedlichen Materialien wie Eisen, Kupfer und Keramik thermisch deutlich besser angebunden. Des Weiteren weisen die keramischen Isolationsschichten, je nach verwendeter Keramik, signifikant höhere Wärmeleiteigenschaften auf. Somit kann ein deutlich besserer Wärmetransport gewährleistet werden, was sich günstig auf die Kühlung der elektrischen Maschine auswirkt. Gleichzeitig stellt sich im Betrieb eine homogenere Temperaturverteilung im Elektromotor ein. Dadurch können Thermospannungen verringert werden.

4.4 Reduzierung der Herstellungskosten im Prototypenbau

Bei der Fertigung von Prototypen und Kleinserien kann der 3D-Multimaterialdruck entscheidend zur Reduzierung der Fertigungskosten beitragen. Da alle wichtigen Komponenten wie

Stator und Rotor in einem Arbeitsgang vollautomatisch hergestellt werden, kann auf die sonst im Prototypenbau üblichen Arbeitsschritte, wie das Lasern der Blechschnitte, deren Paketierung und das Einbringen der Wicklung, verzichtet werden. Diese bedürfen eines hohen Maßes an manueller Tätigkeit, sowie der Anfertigung von Hilfsvorrichtungen, was erheblich zu den Gesamtkosten einer individuell angefertigten elektrischen Maschine beiträgt. Das Verfahren erlaubt gleichzeitig ein Höchstmaß an Flexibilität, da es unerheblich ist, ob nur eine Maschine oder eine Kleinserie von zehn Exemplaren hergestellt werden soll.

4.5 Grenzen des Verfahrens

Bei allen offensichtlichen Vorteilen, die der 3D-Multimaterialdruck bietet, sind auch einige Beschränkungen des Verfahrens hervorzuheben. Grundlegend gilt eine untere Grenze der Strukturfeinheit. Die metallischen bzw. keramischen Pasten lassen sich nicht durch beliebig feine Öffnungen extrudieren. Der zurzeit eingesetzte Forschungsdrucker erlaubt Düsendurchmesser bis 0,4 mm. Es ist abzusehen, dass diese Grenze der Strukturfeinheit nicht nennenswert nach unten verschoben werden kann. Additive Verfahren wie SLS oder SLM oder der 3D-Siebdruck erlauben hier deutlich feinere Strukturen [5]. Weiterhin ist die Bandbreite der zu verarbeitenden Materialien durch die Notwendigkeit einer abschließenden thermischen Behandlung begrenzt. Werkstoffe wie Kunststoff, mit niedrigen Schmelztemperaturen, sind für das Verfahren ungeeignet.

5 Zusammenfassung

Der 3D-Multimaterialdruck stellt ein völlig neues Fertigungsverfahren für elektrische Maschinen dar, mit dessen Hilfe sich die wesentlichen Bestandteile einer elektrischen Maschine in einem Arbeitsgang herstellen lassen. Durch die Substitution von kunststoffbasierten Isolationswerkstoffen durch Keramik werden die thermischen Eigenschaften einer, mit diesem Verfahren hergestellten, Maschine signifikant verbessert, wodurch sich ihre Leistungsdichte deutlich steigern lässt. Gleichzeitig erlaubt die gegenüber konventionellen Herstellungsmethoden erheblich größere dreidimensionale Gestaltungsfreiheit die Herstellung von alternativen Maschinenkonzepten bzw. komplexeren Wicklungsstrukturen.

6 Literatur

- [1] Heidenreich A. M., Dr. Kuckartz M.: 3D-Druck-Potenziale und Herausforderungen für die Hamburger Wirtschaft: Hamburg, Deutschland: Handelskammer Hamburg, Januar 2017
- [2] <http://www.freiepresse.de/WIRTSCHAFT/WIRTSCHAFT-REGIONAL/Drucken-statt-schmieden-Chemnitzer-fertigen-A380-Bauteil-artikel9889310.php>
- [3] Scherer M.: Untersuchung von Möglichkeiten zur Kombination konstruktiver Merkmale von Radial-, Axial- und Transversalflussmaschine: Diplomarbeit: Technische Universität Chemnitz: Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe: Chemnitz: 2012
- [4] Lindner M., Bräuer P., Rudolph J., Werner R., Studnitzky Th.: Utilization predictions for electrical machines with advanced materials and production technologies. Proceedings - 5th International Conference Magnetism and Metallurgy: Ghent: Belgium, June 20 to 22: 2012
- [5] Lindner M., Rudolph J., Bräuer P., Werner R., Studnitzky Th.: Dreidimensionaler Siebdruck als material-, energie- und kosteneffiziente Fertigungsmethode für Komponenten elektromagnetischer Energiewandlungssysteme: Ressourceneffizienz in der Antriebstechnik: ETG-Kongress: Berlin: Deutschland: November: 2013